Influenza dei parametri di saldatura sulla microstruttura di giunti saldati SMAW/GTAW di acciaio X 10 CrMoVNb9-1 (P91)

G. Barbieri, M. Cesaroni, L. Ciambella, G. Costanza, R. Montanari

Questo lavoro descrive i risultati conseguiti nella saldatura dell' acciaio resistente a creep P91. I campioni sono stati sottoposti a due tipi di saldatura, a elettrodo schermato (SMAW) e ad arco con elettrodo infusibile sotto protezione di gas inerte (GTAW automatizzata). E' stata quindi valutata l'influenza dei parametri di saldatura sulla microstruttura del giunto e sulle conseguenti caratteristiche meccaniche (resistenza, resilienza e duttilità) della zona fusa (ZF). In particolare, i parametri analizzati sono stati il rapporto ed il modo di deposizione, l'apporto termico ed il trattamento termico post saldatura (PWHT). Lo studio delle proprietà dei giunti è stato condotto mediante analisi al microscopio ottico, rilievo dei profili di durezza, prove di trazione longitudinale in ZF, test di resilienza e prova di indentazione FIMEC. La ZF mostra caratteristiche di durezza e tenacità considerevolmente differenti rispetto al metallo base (MB) anche dopo i PWHT. La durata del PWHT influenza maggiormente, rispetto agli altri parametri, la tenacità mentre la duttilità è poco influenzata.

Parole chiave: Acciaio inox - Saldatura - Prove meccaniche - Prove non distruttive - Selezione materiali

INTRODUZIONE

La scelta degli acciai per la realizzazione dei componenti strutturali dei reattori nucleari di IV Generazione è ricaduta sugli acciai Ferritici-Martensitici in particolare quelli al 9% di Cr , in virtù della loro capacità di mantenere inalterate le caratteristiche meccaniche, pur operando ad elevate temperature e prolungate esposizioni neutroniche ad alto contenuto energetico, unitamente alla buona resistenza al contatto con fluidi refrigeranti di natura aggressiva [1-2-3].
Il lavoro, è inserito nell'ambito delle attività del progetto MATTER (MATerial TEsting and Rules) che ha come obiettivo quello di individuare e caratterizzare i materiali strutturali, e di fornire dati utili per l'adeguamento della normativa di riferimento francese RCC-MR per la progettazione e fabbricazione di componenti per impianti nucleari [4-5].
La normativa RCC-MR richiede prestazioni più elevate per la qualificazione di giunti di saldatura di componenti nucleari in pressione, rispetto agli standard tradizionali (PED e ASME) utilizzati per i più comuni impianti termici. In particolare, è richiesto un allungamento minimo del 20% e un valore medio minimo di resilienza pari a 60 J a 0 °C. Tali limiti non sono facilmente ottenibili, specialmente nella zona fusa e dipendono principalmente dalla composizione chimica del materiale di riempimento, dai parametri di saldatura (corrente, velocità, tensione) e dal trattamento termico post saldatura (PWHT).
Fissati il materiale di base (P91/ Industeel) e il materiale di riempimento (BohlerThermanit/ MTS3), l'obiettivo è la valutazione dell'influenza dei principali parametri di processo in funzione delle tecnologie di saldatura e del PWHT.
Si è scelto quindi di confrontare due diverse tecnologie di saldatura: GTAW (TIG) meccanizzato, e SMAW (elettrodo).

G. Barbieri, M. Cesaroni
ENEA, CR Casaccia, 00123, Santa Maria di Galeria, Roma

L. Ciambella, G. Costanza , R. Montanari
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Roma -Tor Vergata, 00133 Roma

MATERIALI E TECNICHE SPERIMENTALI

Il materiale base utilizzato è l'acciaio P91 temprato e rinvenuto. Il trattamento prevede un riscaldamento fino ad una temperatura di austenitizzazione di 1071°C, un mantenimento per 4h in forno, un successivo raffreddamento in acqua, ed un rinvenimento a 757°C per 5h 31min. Tale ciclo permette di ottenere una struttura omogenea a gra-

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	Zr	V	Ti	N
0.12	0.457	0.019	0.001	0.205	0.053	0.238	8.977	0.852	0.012	0.082	0.005	0.200	0.002	0.045

T (°C)	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A%
20	568	714	25

Tab 1 - Acciaio P91: composizione (% in peso) e caratteristiche meccaniche.

Table 1 Chemical (% in weight) and Mechanical features of P91.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al	Nb	N
0,10	**0,21**	**0,58**	**< 0,01**	**< 0.01**	**8,5**	**1,01**	**0,44**	**0,19**	**0,04**	**< 0.01**	**0,05**	**0,04**

T (°C)	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A %	PWHT
20	>= 530	>=620	17	760°C/2h

Tab. 2 - Composizione (% in peso) dell'elettrodo e caratteristiche meccaniche: diametro 3.2mm, lunghezza 350 mm,

Table 2 - Chemical (% in weight) and Mechanical features of the electrode: diameter 3.2 mm, lenght 350 mm.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al	Nb	N
0,103	0,23	0,55	0,006	0,002	8,88	1,00	0,49	0,194	0,04	0,004	0,05	0,044

T (°C)	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A %	PWHT
20	>= 410	>=620	15	760°C/2h

Tab. 3 - Composizione di filo e bacchette (% in peso)e caratteristiche meccaniche.

Table 3 - Chemical (% in weght) and Mechanical features of the filler material.

no fine con martensite lamellare per favorire un aumento della resistenza dell'acciaio. I carburi precipitati sono del tipo MX (dove M è Nb o V e X è C o N) e del tipo M23C6 (ad alto tenore di Cr e Mo)[6-7]. Nelle Tab. 1-3 sono indicate le composizioni chimiche sia del materiale base (P91) che del materiale di riempimento, utilizzati.

In Tab. 4 sono riportati i risultati dei test effettuati sul materiale base tal quale e sottoposto ai due differenti PWHT: PWHT1 corrisponde a due ore di permanenza a 760 °C, PWHT2 a quattro ore a 760 °C. Si può osservare che a seguito dei trattamenti termici il materiale subisce modeste variazioni del carico di snervamento, di rottura e dell'allungamento percentuale A%.

Per entrambi i processi studiati, in base ai dati di letteratura [8-9-10], è stato deciso di analizzare l'influenza di quattro parametri:

1- Velocità di deposizione (Deposition Ratio DR);
2- Modo di deposizione;
3- Apporto termico (Heat Input HI);
4- Durata del PWHT.

Sono stati quindi scelti due differenti angoli di cianfrino (60° e 75°), due modalità di deposizione ("String Beads - Passata Stretta", "Weave Beads - Passata Larga", ottenute attraverso differenti velocità di saldatura Ws) e due differenti tempi per il PWHT (2h, 4h) fissando la temperatura a 760°C.

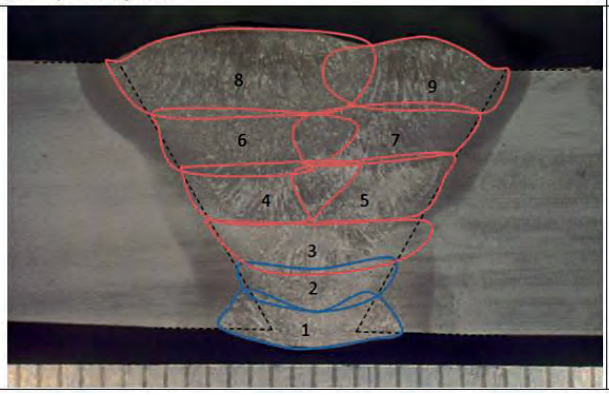
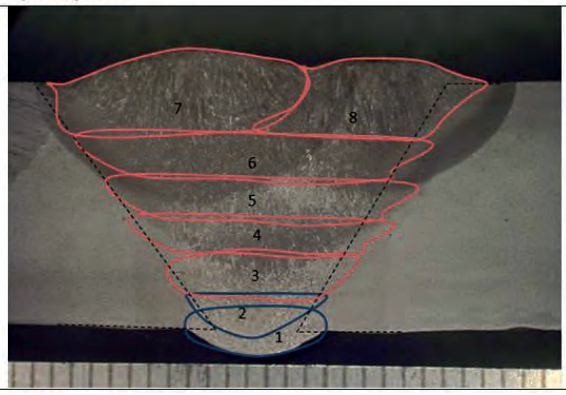
	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A%
BM RD	559	705	23
BM ORD	559	704	24
BM ORD PWHT1	552	699	26
BM ORD PWHT2	547	699	24

Tab. 4 - Valori medi del carico di snervamento, di rottura e dell'allungamento percentuale misurati sul metallo base nella direzione di laminazione (RD) e ortogonale (ORD) prima e dopo i PWHT.

Table 4 - Average values of yield point, ultimate strength and elongation measured on metal base in the rolling direction (RD) and orthogonal (ORD) before and after PWHT.

SALDATURA SMAW

I giunti sono stati realizzati con due differenti velocità di saldatura, un preriscaldo (Tp) di 200° C ed una temperatura di interpass (Ti) di 260 °C. Successivamente sono stati sottoposti ad un trattamento di deidrogenazione a 350° C per due ore, prima del definitivo PWHT nello stesso forno

String beads 160-260	Weave beads 175-275
SMAW	**SMAW**
Ws=165 cm/min	Ws=137 cm/min
DR = 1,27 g/cm	DR=1,83 g/cm
HI = 1,18 KJ/cm	HI=1,48 KJ/cm
GTAW	**GTAW**
Ws=75 cm/min	Ws=63 cm/min
DR1=1,15 g/cm	DR1=1,12 g/cm
HI=1,66 KJ/cm	HI=1,9 KJ/cm
	

Tab. 5 - Parametri di saldatura per l'ottenimento delle due modalità di deposizione.

Table 5 - Welding parameters for the two modes of deposition.

utilizzato per i giunti saldati GTAW. I campioni sono identificati da una sigla numerica a 3 cifre, di cui la prima indica il PWHT (1 o 2) mentre le altre due si riferiscono all'angolo di cianfrino (60° o 75°). Sono stati realizzati 4 talloni di qualifica (160, 260, 175 e 275); i parametri riportati in Tab. 5 si riferiscono a due differenti modalità di deposizione.
Sui campioni di qualifica sono stati eseguiti test di trazione, di durezza e resilienza in accordo alla normativa di riferimento (UNI EN ISO 15614-1; Transversal tensile test: ISO 4136 - 2011 & ISO 6892-1; Longitudinal tensile test: ISO5178 - 2011 e ISO 6892-2, ISO 9015) che hanno portato ai risultati di Tab. 6. Per quanto riguarda il carico di rottura Rm e di snervamento Rp 0.2 tutti i campioni sono in linea con i parametri richiesti dalla normativa francese RCC- MR (Rp 0.2 > 400 MPa e 580<Rm<760 MPa). Per quanto riguarda l'allungamento percentuale (A%) i risultati non rientrano nei limiti richiesti (A% >20%). Per quanto concerne il valore di resilienza nella zona fusa l'obiettivo di raggiungere un valore di 60 J a 0°C è stato possibile solo per il campione 275 (condizione "Weave beads") a discapito però di un minore allungamento percentuale A%. I risultati in Tab. 6 sono in linea con dati di letteratura reperibili in studi similari [11-12-13].
Dai profili di microdurezza (Fig. 1) si osserva, all'aumentare della durata del PWHT, una riduzione dei valori in tutto il profilo compresa la porzione riferita al MB che mostra valori inferiori a HV 200 rispetto al valore di riferimento del MB non trattato di HV 207, risultato prevedibile, a causa di un "over ageing" in linea con i risultati di altri studi [14]. Allo stesso tempo si osserva una durezza maggiore alla radice (base del cordone di saldatura) rispetto alla testa del giunto (parte superiore del cordone di saldatura) a causa del diverso rapporto di diluizione del materiale d'apporto, ovvero di una maggiore quantità di materiale base rifuso nella prima passata rispetto alle ultime.
Complessivamente la maggiore durata del PWHT è ben sopportabile da parte del MB ed indica una riduzione delle caratteristiche meccaniche della ZF che dovrebbe di conseguenza portare ad una maggiore duttilità del giunto [15-16].

campione		ISO 5178			ISO 4136	ISO 15614
		$RP_{0,02}$ (MPA)	Rm (MPA)	A%	Rm (MPA)	KV (J)
160	Mean	629.4	752.1	18.48	693,5	27
	St.dev.	15.3	12.7	0.56	1,3	15.7
260	Mean	586	711.2	18.73	689,4	38
	St.dev.	1	2.1	0.65	1,0	7.5
175	Mean	636.2	750.6	18.58	695,0	51
	St.dev.	4.2	6.7	0.43	1,2	6.8
275	Mean	608.4	730.1	16.28	693,2	61
	St.dev.	3	6.7	1.38	2,9	6.8

Tab. 6 – Riepilogo dei risultati dei test di trazione e resilienza per ZF.

Table 6 - Summary of tensile and Charpy tests for ZF .

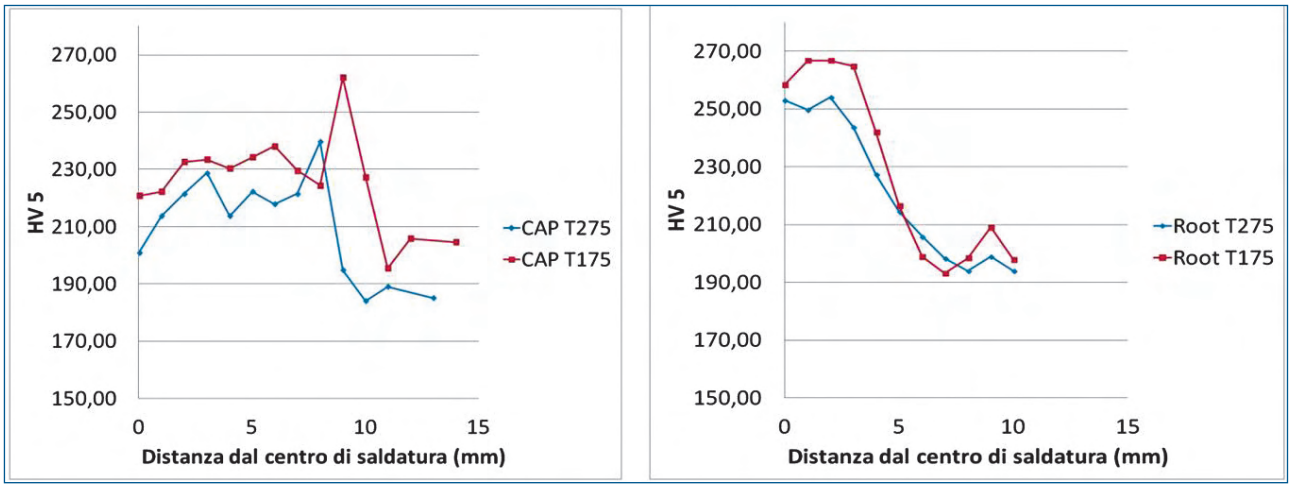


Fig. 1 – Confronto fra i profili di durezza alla testa (Cap) ed alla radice (Root) delle saldature.

Fig. 1 - Comparison of profiles hardness to the head (Cap) and the root (Root) weld joint.

SALDATURA GTAW

L'intervallo di parametri investigati per la realizzazione del processo sono riportati in Tab. 7:

Mode	I	V	Ws [mm/min]	Wfs [mm/min]	HI [kJ/mm]	DR [g/cm]	N. Pass	Smusso
LDR	230	12	120	660	1,38	0,34	18	75
	230	13	120	660	1,50	0,34	18	75
TDR	230	11,3	120	1750	1,30	0,89	8	75
	230	12,4	120	1750	1,43	0,89	8	75
	250	13,5	144	1980	1,41	0,84	7	60
	250	13	144	1980	1,35	0,84	7	60
HDR	250	12	120	1980	1,50	1,01	6	60
	250	12,5	120	1980	1,56	1,01	6	60

Tab. 7 – Set-up dei parametri di saldatura (LDR: Tasso di deposizione basso, TDR: Tasso di deposizione bersaglio, HDR: Tasso di deposizione alto. Ws : Velocità di saldatura (Welding Speed, Wfs: Velocità del filo d'apporto (Welding filler speed).

Table 7 - Welding parameter set-up (LDR: Low deposition ratio, TDR: Target deposition ratio, HDR: High deposition ratio. Ws: welding speed, Wfs: Welding filler speed.

L'analisi di questo primo piano sperimentale, realizzato con un HI similare ma diverso DR e differente angolo di cianfrinatura riproducendo il tipo di deposizione "String Beads" V75; "Weave Beads" V60, è avvenuta essenzialmente attraverso test di durezza, analisi metallografica e radiografica.
In Tab. 8 sono riportate le microstrutture del metallo base (BM), della zona di transizione (ZTA-ZF) e della zona fusa (ZF) ottenuta per i giunti nelle condizioni di LRD e TRD.
Mentre sul MB la differente durata del trattamento termico non mostra differenze di microstruttura apprezzabili, nella ZF si osserva come la microstruttura, pur presentandosi in entrambi i casi come una martensite lamellare rinvenuta, questa sia molto più omogenea nel caso di LDR rispetto al caso TDR in accordo a quanto riportato in letteratura [17-18].
In questo caso, comparando i profili di durezza fra le condizioni di LDR e TRD si osserva che a parità di trattamento termico si hanno valori paragonabili di durezza mentre solo in corrispondenza della radice del cordone si verifica un leggero slittamento (Fig. 2) che è dovuto alla maggiore larghezza della ZF in virtù del maggiore angolo di cianfrinatura.
Ciò fa presumere che il parametro che maggiormente influenza la durezza e le caratteristiche del

Le piastre di qualifica finali sono state realizzate con i parametri della tabella seguente (Tab. 9), fissando il DR al valore di riferimento (0,67 g/cm), scelto come buon compromesso fra produttività ed omogeneità della microstruttura. Anche in questo caso, anche a parità di DR. è stato deciso di verificare l'influenza del modo di deposizione a cordoni stretti/larghi variando contestualmente il Ws e Wfs, utilizzando differenti HI.

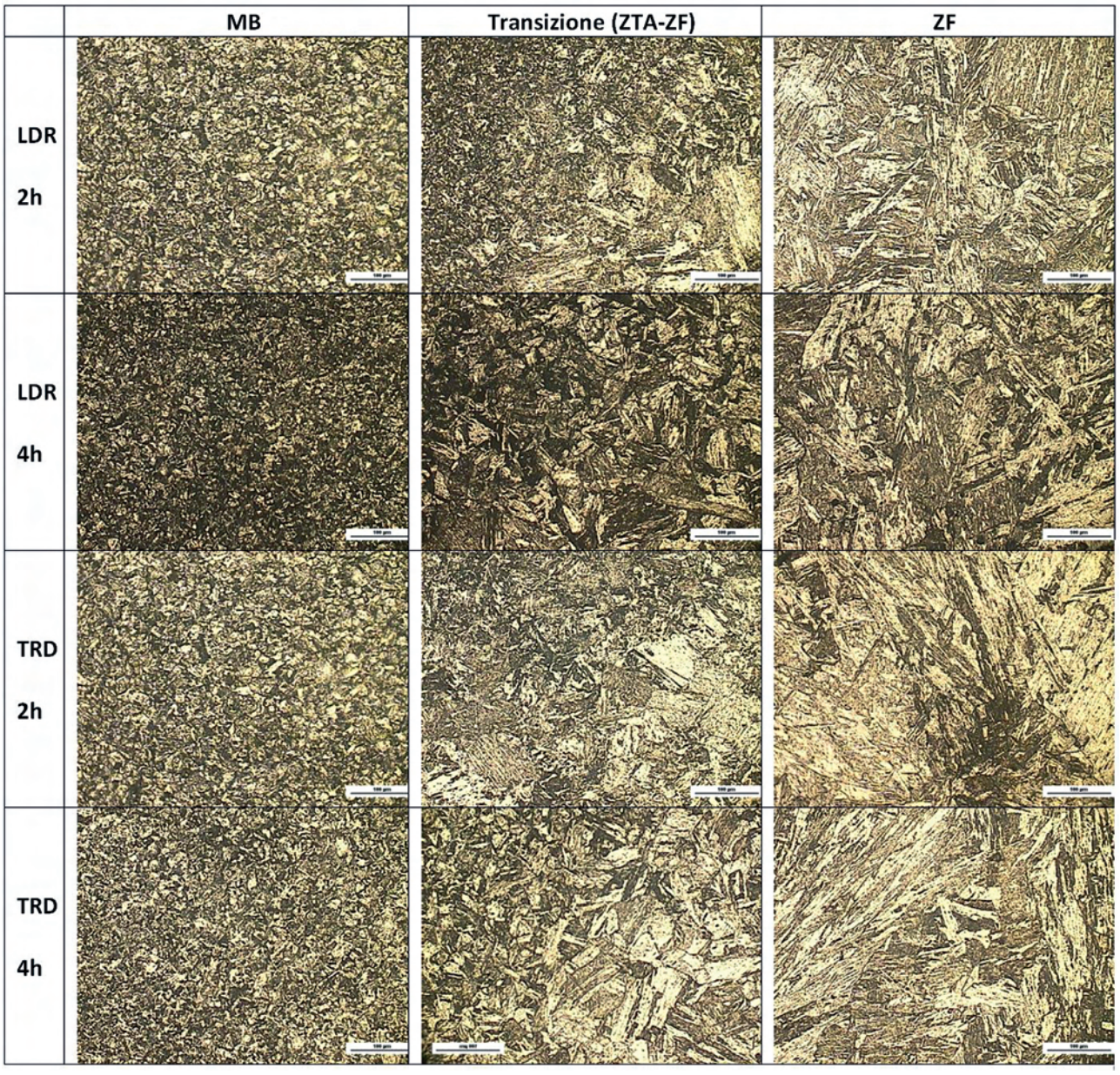
Id	I(A)	V(V)	Ws (mm/min)	Wfs (mm/min)	HI (KJ/mm)	N.pass.	D.R. (g/cm)	Bevel
G75xy	230	12	120	1320	1,41	11	0,67	75°
G60xy	250	12	90	990	1,84	8	0,67	60°

Tab. 9 - Parametri finali GTAW

Table 9 - Final parameter GTAW

Dai profili di durezza realizzati sui campioni ottenuti utilizzando i parametri della Tab. 9 (G60xy, G75xy) si può evidenziare che in analogia a quanto accadeva per i campioni realizzati con SMAW il trattamento termico prolungato 4h riduce il valore di durezza.

I profili realizzati con un carico di 200 gf mettono bene in luce una delle problematiche maggiori della saldatura di questo tipo di acciai ovvero la formazione di una zona di softening all'interfaccia fra MB e ZTA, evidenziate nei grafici, che è origine delle cosiddette rotture "type IV cracking".



Tab. 8 – Confronto microstrutture LDR-TDR. *- Table 8 - LDR-TDR microstructures comparison.*

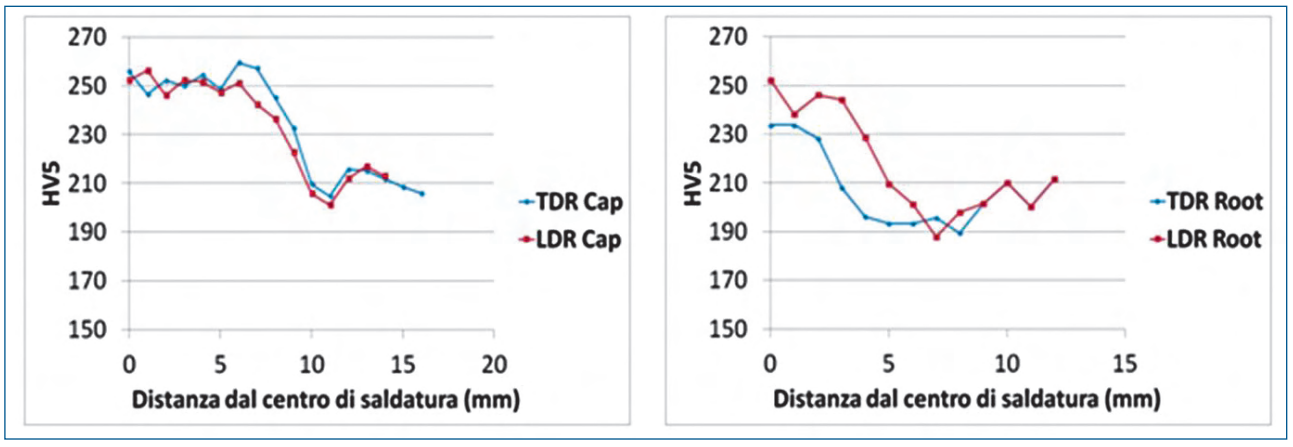


Fig. 2 – Confronto fra i profili di durezza a parità di PWHT.

Fig. 2 - Comparison of profiles hardness with same PWHT.

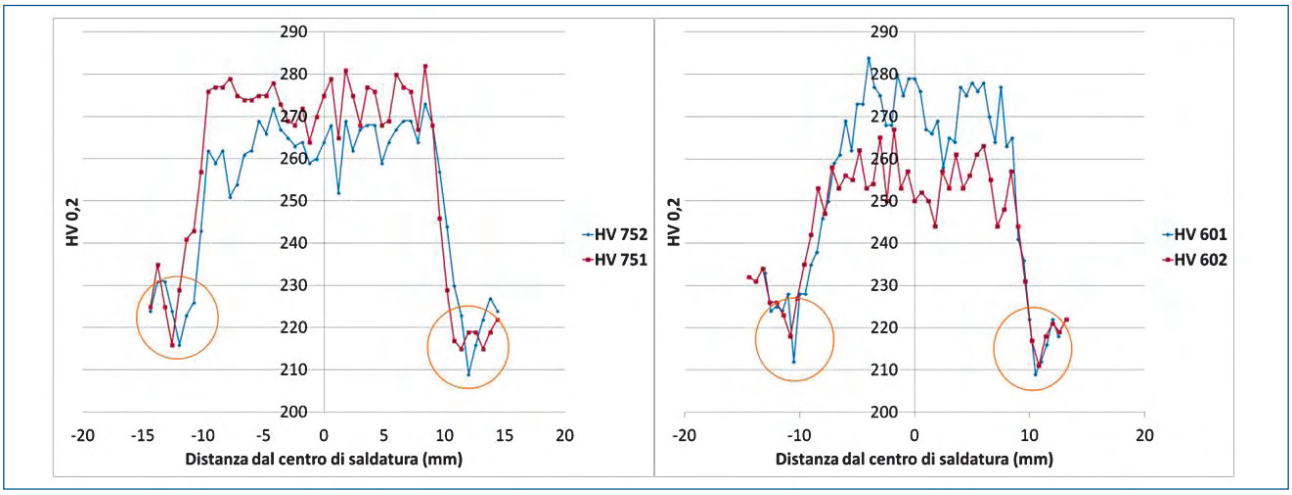


Fig. 3 – Profili di durezza in funzione delle differenti condizioni di saldatura e PWHT.

Fig. 3 - Hardness profiles as function of different welding conditions and PWHT.

Nella Fig. 4 è riportata la sezione macrografica tipica dei giunti realizzati a parità di DR e differente HI.
Allo stesso modo di quanto fatto per le saldature SMAW, sui giunti GTAW sono stati effettuati test di trazione, di durezza e resilienza (Tab. 10) . In aggiunta sono stati realizzati anche test di trazione longitudinale alla temperature di 550°C (Tab. 11), temperatura di test richiesta per il BM dal RCC-MR.

campione		ISO 5178			ISO 4136	ISO 15614
		$RP_{0,02}$ (MPA)	Rm (MPA)	A%	Rm (MPA)	KV (J)
G601	Mean	682,5	790	17,6	701,6	145,7
	St.dev.	1,3	1,1	0,1	3,4	5,5
G602	Mean	666,3	772,1	17,8	689,5	167
	St.dev.	6,4	4.2	0,3	2,0	11,4
G751	Mean	696,8	796,2	17,0	697,8	150,7
	St.dev.	6,8	0	0.1	5,3	13
G752	Mean	680,8	781,3	17,9	703,9	171,3
	St.dev.	14,2	10,6	1,6	3,3	5,5

Tab. 10 – Riepilogo dei risultati dei test di trazione e resilienza per ZF.

Table 10 - Summary of tensile and Charpy tests for ZF

campione		ISO 5178		
		$Rp_{0,2}$ (Mpa)	Rm (MPA)	A%
G602T	Mean	429,8	453,5	21,8
	St.dev.	1,9	1,5	0,8
G752T	Mean	429,7	451,4	20,2
	St.dev.	4,3	1,5	0,6

Tab. 11 - Riepilogo dei risultati dei test di trazione effettuati a 550°C.

Table 11 - Summary of tensile tests at 550 ° C.



Fig. 4 - Macrografia giunto "Bersaglio".

Fig. 4 - Macrography of Target joint.

Nei test eseguiti a temperatura ambiente, la FZ mostra valori molto elevati di Rm che non risultano conformi ai requisiti della RCC - MR (Max 760 MPa) previsti per il BM. Al tempo stesso l'allungamento, come mostrato per il SMAW, è superiore al 17 % , promesso dal materiale di riempimento utilizzato, ma inferiore alla soglia del 20 % richiesta per il BM. L'influenza del tempo di mantenimento del PWHT sulle caratteristiche dei giunti è uguale a quanto osservato per i campioni SMAW: si ottiene una riduzione della resistenza e un aumento dell'allungamento, all'aumentare del tempo del PWHT. La prova effettuata a 550 ° C presenta valori di Rp 0,2 più elevati di quanto richiesto (260 MPa) e l'allungamento è superiore al 20 %. Per la prova di resilienza si registrano valori più elevati rispetto a quelli ottenuti con tecnica SMAW (circa il doppio) largamente in accordo con quanto richiesto dalla normativa (60 J /0°C).

ANALISI FIMEC

Ad integrazione dei dati sperimentali ottenuti su diversi campioni saldati mediante tecnica SMAW sono state effettuate ulteriori caratterizzazioni, mediante controlli di tipo non distruttivo, con la tecnica di indentazione strumentata FIMEC (Flat-top Cylinder Indenter for MEchanical Characterisation) [19]. Il test FIMEC è una prova di indentazione strumentata che impiega un indentatore di geometria cilindrica a testa piatta in WC sinterizzato di raggio pari a 0,5 mm e permette di determinare alcune delle principali proprietà meccaniche di un materiale metallico. Il FIMEC consente di ricavare le caratteristiche tensili di un materiale metallico in corrispondenza delle zone in cui possono avere luogo variazioni locali delle proprietà meccaniche come nel caso delle diverse zone di un giunto saldato. La penetrazione della punta nel materiale da esaminare avviene a velocità costante (0,1 mm/min). Nel corso della prova si registrano il carico e la profondità di penetrazione. Dividendo il carico per l'area della punta si ottengono curve pressione-penetrazione con un andamento caratteristico.
Sono stati realizzati test di indentazione in 3 diverse zone del campione P91-260 (MB, ZTA e Saldatura). Dall'analisi FIMEC è stato possibile valutare la tensione di snervamento mediante l'algoritmo descritto in [20]. Le curve FIMEC ottenute ed i valori di tensione di snervamento associati sono riportati in Fig. 5. Tali valori sono stati confrontati con quelli ottenuti da test standard di trazione condotti su provini estratti dal BM e dal cordone di saldatura e riportati in Tab. 6. Questi dati confermano quanto ottenuto con le prove di trazione e forniscono informazioni addizionali sulla ZTA.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata investigata la saldabilità dell'acciaio P91 con tecnica SMAW e TIG automatizzata in funzione dell'influenza dei parametri di saldatura e del trattamento termico post saldatura (PWHT), con l'impiego di materiali d'apporto, candidati alla saldatura di componenti, con qualificazione nucleare secondo le normative di riferimento. L'analisi ha messo in evidenza che i parametri di saldatura uniti ai trattamenti PWHT effettuati su i saggi con SMAW inducono nella ZF una notevole riduzione della resilienza misurata con test Charpy, come anche la duttilità mostra un allungamento percentuale che per quanto superi il limite minimo promesso dal filler material MTS3 (17%) difficilmente va oltre al 18%. Mentre è stato verificato come il trattamento termico a maggiore durata influenzi notevolmente la resilienza portando a superare i limiti imposti per i componenti N1x nel caso dei parametri 275 ovvero cordoni larghi e apporto termico elevato, la duttilità del giunto non sembra essere influenzata sufficientemente dalla durata del PWTH.
Per i saggi realizzati con tecnica GTAW, in analogia a quanto visto per i campioni saldati con tecnica SMAW, l'analisi dei profili di durezza confermano come il parametro che più influenza i valori è la durata del PWHT rispetto al modo di deposizione. Anche per i campioni realizzati con tecnica GTAW l'allungamento è stato inferiore del 20 % , mentre si sono ottenuti buoni risultati in termini di resistenza e tenacità del giunto.
Alla luce dei risultati ottenuti, l'aumento del tempo del PWHT sembrerebbe essere la chiave per ottenere valori di allungamento pari o superiori al 20 % ,anche se ciò comporta una maggiore probabilità della formazione del "Type IV cracking".
Saranno necessari dei dati, relativi a test di creep, per comprendere appieno se una riduzione del valore soglia dell'allungamento è ammissibile, e prendere in considerazione un adeguamento della RCC-MR con valori meno stringenti per le saldature rispetto al materiale base preso come target per questo lavoro.
Le prove FIMEC dimostrano come sia possibile ottenere delle informazioni attendibili sulle proprietà meccaniche del giunto. Queste associate a rilievo di profili di durezza ed a repliche metallografiche su saldature di componenti in esercizio, possono essere un valido strumento per ottenere dei dati sulla durata di vita residua di componenti, ad esempio monitorando le caratteristiche nel tempo delle zone "type IV cracking".

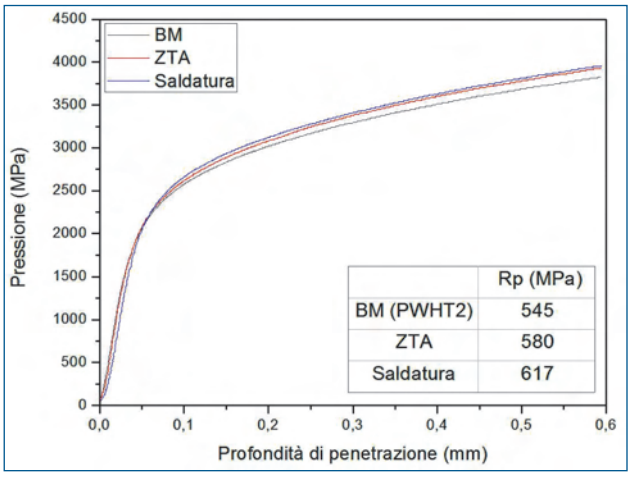


Fig. 5 - Curve di indentazione FIMEC e valori di tensione di snervamento ottenuti su tre diverse zone del provino P91-260 (BM, ZTA e Saldatura).

Fig. 5 - Indentation FIMEC curve and values of yield stress obtained on three different areas of the specimen P91-260 (BM , HAZ and ZF) .

BIBLIOGRAFIA

1] D.R. HARRIES, R. L. KLUEH, High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications, ASTM stocK number: mono3 (2013).
2] J.I. COLE, J.L. REMPE, T.C. TOTEMEIER, G.S. WAS, K. SRIDHARAN, T. ALLEN, J. JANG, S. HONG, Developing and Evaluating Candidate Materials for Generation IV Supercritical Water Reactors, Technical report, INL (2006).

3] A. CAMMI, S. CONCARI, Metodi di prova di materiali esposti a metalli liquidi, Rapporto Tecnico,RSE, (2011).
4] T. LIRATZIS, Rivista italiana della saldatura, No.2 (2010), p.16.
5] A.TONTI, Main issues for use P91in nuclear power plants, Atti di European Nuclear Conference Barcellona, (2010).
6] R.E. MIZIA , Next Generation Nuclear Plant Reactor Pressure Vessel Acquisition Strategy, Technical report, INL (2008).
7] C. PANAITS, W. BENDICK, A. FUCHSMANN, J. BESSON, A.-F. GOURGUES–LORENZON, International Journal of Pressure Vessels and Piping 87 (2010), p. 326.
8] H. HUESER, Properties of matching filler metals T91/P91, EPRI-RRAC, Atti di Fifth International Conference of Welding and Repair technology for power Plant, (2002).
9] M. L. SANTELLA, R. W. SWINDEMAN, R. W. REED, J. M. TANZOSH, Martensite transformation, microsegregation, and creep strength of 9 Cr-1 Mo-V steel weld metal, Atti di Trends in Welding Research-International Conference, (2003).
10] R. SINGH, M.S., IENG, MWELDI, Pipeline & Gas Journal, vol.238 No.10 (2011).
11] B. SILWAL, L. LI, A. DECEUSTER, B. GRIFFITHS, Welding Journal, Vol. 92 (2013), p. 80.
12] D.P. SINGH, M. SHARMA, J.S. GILL, IJRMET Vol. 3 (2013), p. 216.
13] G. TANIGUCHI, K. YAMASHITA, Effects of Post Weld Heat Treatment (PWHT) Temperature on Mechanical Properties of Weld Metals for High-Cr Ferritic Heat-Resistant Steel, Welding in the World, vol.56 (2012), p.81.
14] A. MCGEHEE, K. COLEMAN, Optimal Hardness of P91Weldments, EPRI, Technical Report (2003).
15] P. DE SMET, H. VAN WORTEL, Welding Journal, vol.85 (2006), p.42.
16] A. DIMATTEO, Rivista italiana della saldatura, No.2 (2012), p.153.
17] B.ARIVAZHAGAN, R.PRABHU, S.K. MARARAJ, S.SUNDARESAN, Journal of Materials Engineering & Performance , vol.18 (2009), p.999.
18] T. VUHERER, M. DUNDER, LJ. MILOVIC, M. ZRILIC, I. SAMARDZIC, METALURGIJA 52 (2013), p. 317.
19] B. RICCARDI, R. MONTANARI, Materials Science & Engineering A, 381/1-2 (2004), p. 281.
20] L. CIAMBELLA, R. MONTANARI, Materials Science Forum, Vol. 783-786 (2014), p. 2272.

Influence of welding parameters on microstructure of welded joints SMAW/GTAW steel X10 CrMoVNb 9-1 (P91)

Keywords: Stainless steel - Welding - Mechanical test - Non destructive test - Selecting materials

This paper presents weldability results of P91 creep resistant steels performed through two different welding technologies: the " fully mechanized (GTAW)", and the "Shielding Metal Arc Welding (SMAW)"
It was evaluated the influence of welding parameters on the microstructure of the joint and on the consequent mechanical characteristics (Strength, toughness and ductility) of the fused zone (ZF).
With reference to the P91 creep resistant steel (Tab.1), the RCC-MRx code for the design and production of components for nuclear power plants, have data sheet about the chemical and mechanical features of "Base Material" (BM) but does not have data sheet about filler materials, as qualified for welding nuclear components class 1.
Scope of this work is to evaluate possible candidate filler material (Tab.2) and to suggest welding technologies and related operative welding conditions to ensure that N1 class could be produced with the same requirements as the Base Material, in compliance to the design code.
The main objective of this study is to evaluate the candidate filler materials and suggest welding conditions optimized for PWTH, Heat Input (HI), and Deposition Mode/Ratio(DM/DR), to obtain an elongation of more than 20 % and a toughness of more than 60 J to 0°C (as evaluated by Charpy KV test)in the fused zone (ZF).
For both processes, according to the literature data, it was decided to analyze the influence of four parameters: speed of deposition (deposition ratio DR); mode of deposition (DM); Heat input (HI); duration of PWHT . To varying DR/DM were chosen two different bevel angles (60 ° and 75 °), two modes of deposition (" String Beads", " Weave Beads "), obtained through different welding speed Ws. Two different holding times (2h , 4h) for PWHT were investigate to evaluate the influence of Time on the feature of FZ.
The test was carried out in compliance within the RCC- Mr and the correlate ISO Standard: (UNI EN ISO 15614-1 ; Transversal tensile test : ISO 4136-2011 & ISO 6892-1 ; Longitudinal tensile test : ISO5178 - 2011 and ISO 6892-2 , ISO 9015). The Data about the performed test are reported in Tab. 6.
In general for both the welding technology evaluate, the Fused Zone as welded have a fully martensitic microstructures, this is demonstrated by the high value of hardness. After the PWHT the hardness in FZ decreases from more of

400 to 230-250 HV5, typical values of tempering martensite. The comparison between the hardness profiles measured at different conditions and PWHT show that the duration of the holding time influences the hardness (Fig.1). If the holding time increases the hardness in FZ decreases.
About SMAW, the toughness improves with increasing the holding time of the PWHT. However only for the condition of welding “weave beads” the value is in compliance with the RCC- MR (Tab. 6). In general, a little reduction of tensile strength was observed after the PWHT, and the differences increase with the increase in holding time.
At the same way, the test on GTAW coupons, confirming that longer PWHT holding time induces a reduction in the hardness of fused zone.
The micro hardness test highlighted the well know problem of softening in the interface between of HAZ and BM, where the material was subjected to an unavoidable over-tempering (Fig.3).
The V notch Charpy tests on GTAW weld shown very high values (higher than SMAW) in all the case in compliance with the requirement of RCC-MR.
The longitudinal tensile test at room temperature for GTAW ZF specimens (Tab.10), shows very high values of Rm than SMAW. However, this high values are not in compliance with the requirements of the RCC-MR (Max 760 MPa).
At the same time the values of elongation, both for GTAW and SMAW processes, is more than 17%, which is promising for a filler material but less than the 20%, threshold required for the BM and the target for the welds.
The influence of holding time of PWHT on the mechanical features is the same for the two processes analyzed. The strength is reduced and the elongation increased with augment of holding time of the PWHT.
The longitudinal tensile test at 550°C were performed only for the GTAW coupons and shown values of Rp 0,2 more than required (260 MPa) and an elongation more than 20 (Tab.11)..
The SMAW and GTAW shown that the “weave beads” Deposition Mode allowed obtaining the best results in terms of toughness and ductility. The holding time of PWHT influenced the toughness, hardness and strength of the welds. The holding time of 4 h appear to allow the best results.
The elongation in all tests for processes at room temperature were less than 20 %. The fully mechanized GTAW showed values of strength very high in association with very good toughness. In all the processes two main problem remain: The softening zone between HAZ and BM (Type IV Cracking zone); The elongation less than 20% , which is requested for the Base Material.
Values of elongation of 17-18% are commonly achievable from a wide range of processes and welding parameters. To increase this value, the augment of the PWHT holding time seems to improve the elongation but a long time of PWHT means a higher over-tempering of the Type IV Cracking zone.
So, in conclusion, the filler material used in this work is a good candidate to weld Nuclear component made of P91, however the target in terms of ductility and maximum strength, required as BM of RCC-Mr, needs to be reviewed.